



Departamento de Térmica y Fluidos

TRABAJO DE FIN DE GRADO

*Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales*

# PROPAGACIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO EN UN MEDIO POROSO CON BURBUJAS GASEOSAS

**Alumno:** Javier Quesada Cano

**Tutores:** Miguel Ángel Parrales Borrero

Pablo Peñas López

## AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, gracias a toda mi familia por el apoyo constante e incesable tanto durante este último cuatrimestre, como durante toda la carrera y a lo largo de toda mi vida. Por estar siempre encima de mí y apoyarme en todas las situaciones: gracias.

Gracias a mi compañero de laboratorio, y a veces, solo a veces, amigo, David, por todas esas horas muertas mirando unos puntos aparecer mágicamente en la pantalla del ordenador, por los vídeos chorra que se cruzaban en nuestro camino y, en definitiva, por las risas que nos hemos echado, que han ayudado a hacer todo esto algo más ameno.

Quiero agradecerse también a los dos personajes que han estado ahí, si bien desde que empezamos esta aventura en la carrera, con mucha más fuerza este último año. Jaime y Ramón, gracias por desviarme de mis estudios, y de todo lo demás, siempre que ha sido necesario hacerlo (y cuando no lo ha sido, también). Os debo mucho.

Gracias también a los profesores que, desde que empecé en el colegio, y siguiendo en el instituto, me han inspirado a no pararme ante nada y seguir siempre lo que más deseo en este mundo.

Finalmente, gracias a Pablo y Miguel por estar siempre ahí para echar un cable cuando era necesario y, sobretodo, por este último apretón que nos ha descolocado un poco a todos.

Y en general, gracias a todo aquel/aquella que se ha cruzado en mi camino y me ha enseñado algo nuevo.

## 0. Índice contenidos.

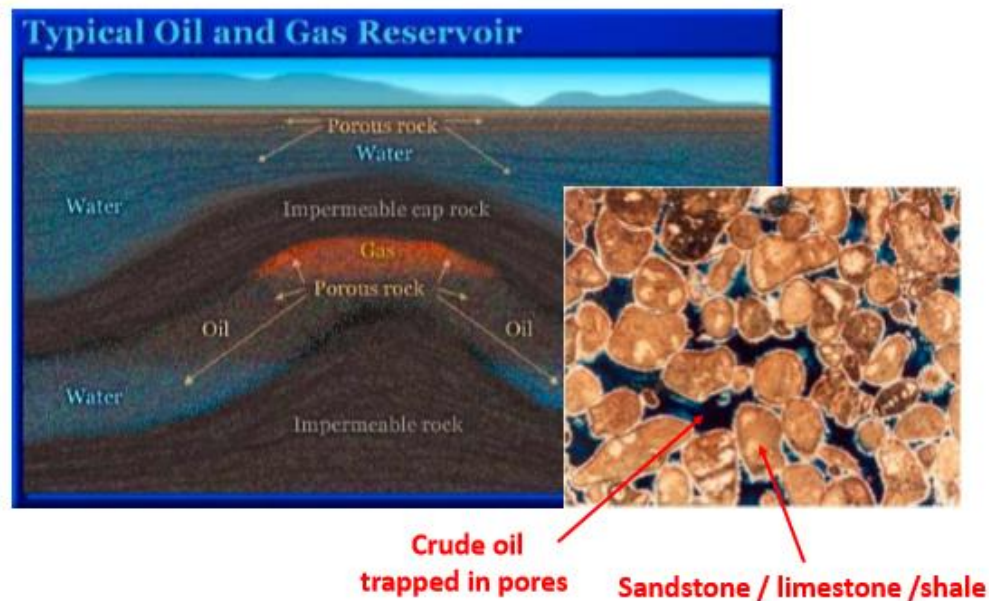
PROPAGACIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO EN UN MEDIO POROSO CON BURBUJAS	
GASEOSAS .....	1
AGRADECIMIENTOS.....	2
0. Índice contenidos. ....	3
1. Índice de figuras. ....	4
2. Motivación. ....	5
3. Introducción teórica. ....	8
4. Materiales y método. ....	10
a. Set-up y análisis. ....	10
b. Proceso de obtención de datos. ....	14
5. Análisis de resultados experimentales. ....	16
a. Amplitud de onda en disoluciones parciales y totales. ....	16
b. Análisis óptico. Evolución del radio. ....	17
c. Señal acústica en distintos tiempos. ....	17
d. Comprobación de proceso isoterma. ....	20
e. Ritmo de disolución y crecimiento. ....	22
6. Análisis frecuencial. ....	26
a. Sistema espectral. ....	27
b. Parámetro de atenuación. ....	29
c. Fracción de vacío. ....	31
d. Atenuación frente a fracción de vacío. ....	33
7. Modelo teórico. ....	34
8. Conclusiones. ....	40
9. Bibliografía. ....	41

## 1. Índice de figuras.

Figura 1 - Esquema laboratorio.....	10
Figura 2 - Medios poroso utilizados .....	11
Figura 3 - Captura frontal del medio poroso.....	11
Figura 4 – Señal temporal acústica, para diferentes configuraciones .....	12
Figura 5 - Amplitud señal acústica (tamaño de poro: 0.9mm).....	12
Figura 6 - Método medida del radio de burbuja.....	13
Figura 7 - Amplitud señal acústica (tamaño de poro: 1.2mm).....	16
Figura 8 - Señal temporal acústica a diferentes presiones .....	17
Figura 9 - Relación isoterma (0.9mm) .....	21
Figura 10 - Relación isoterma (1.2mm).....	21
Figura 11 - Volumen normalizado y Amplitud de la señal acústica (0.9mm).....	22
Figura 12 - Volumen normalizado y Amplitud de la señal acústica (1.2mm).....	22
Figura 13 – Pendientes.....	23
Figura 14 - Pendientes del Volumen normalizado frente a la presión (0.9mm) .....	24
Figura 15 - Pendientes de la Amplitud acústica frente a la presión (0.9mm) .....	24
Figura 16 - Pendientes del Volumen normalizado frente a la presión (1.2mm) .....	25
Figura 17 - Pendientes de la Amplitud acústica frente a la presión (0.9mm) .....	25
Figura 18 - Señal temporal y frecuencial transmitida en agua .....	27
Figura 19 - Señal frecuencial acústica, para diferentes configuraciones .....	28
Figura 20 - Señal frecuencial acústica a diferentes presiones .....	28
Figura 21 - Parámetro de atenuación a diferentes frecuencias (Poro de 0.9mm).....	29
Figura 22 - Parámetro de atenuación a diferentes frecuencias (Poro de 1.2mm).....	30
Figura 23 - Fracción de vacío del sistema.....	31
Figura 24 - Parámetro de atenuación frente a la Fracción de vacío .....	33
Figura 25 - Esquema del Modelo de Dispersión Múltiple .....	35
Figura 26 – Variación de la intensidad acústica en el medio .....	37
Figura 27 - Variación de la intensidad acústica, para diferentes tamaños de burbuja.....	38
Figura 28 - Parámetro de atenuación frente al tamaño de burbuja (Teórico) .....	39
Figura 29 - Parámetro de atenuación frente a la Fracción de vacío (Teórico).....	39

## 2. Motivación.

Típicamente, las grandes reservas de gas natural o petróleo que existen bajo la superficie de nuestro planeta no se encuentran como una gran burbuja o depósito rodeado de roca maciza, si no que aparece en una mezcla con los materiales que formen la corteza terrestre en esa región, como arena o caliza. El fluido de interés ocupa los intersticios y huecos que deja libre el material sólido, dificultando en gran medida detección.



El primer paso que se da en este tipo de extracciones de combustible es la caracterización de la reserva, procediendo a una estimación del volumen de gas/petróleo contenido en el emplazamiento.

Existen diversos métodos que permiten la determinación del volumen de hidrocarburos que contiene una reserva concreta, en función de los recursos económicos disponibles y del conocimiento que se tenga de la región. De esta forma, distinguimos tres clases de métodos: volumétricos, balance de materia, y curvas de declinación.

Los métodos volumétricos son de gran ayuda cuando la información que se tiene del entorno es escasa, permitiendo sin embargo realizar un cálculo bastante aproximado del volumen. Aun así, será necesario complementar los resultados con nueva información a medida que avancemos en la expedición. Dentro de este primer bloque encontramos:

- Método de cimas y bases: hace un cálculo teniendo en cuenta las cimas y bases del terreno.

- Método de isopacas: a partir del volumen de roca del yacimiento, y con valores de porosidad y saturación promedio, provee de un valor del volumen de hidrocarburos contenido.

Los balances de materia suponen un avance a los volumétricos, ya que proveen de información de la reserva no solo al inicio, si no durante cualquier etapa de la explotación. Se basan, simplemente, en una derivación de principio de conservación de la masa.

$$[masa\ original\ HC] - [masa\ producida\ HC] = [masa\ remanente\ HC]$$

Esto implica que este conjunto de métodos no pueda ser aplicado al principio del desarrollo, pues no se ha extraído cantidad alguna de gas aún. Sin embargo, teniendo suficiente información histórica de producción y presión, su aplicación puede dar mucha más certidumbre.

Finalmente, los métodos por declinación se basan en asumir que la producción futura de hidrocarburos sigue una tendencia, pudiendo así usar un modelo de curvas de declinación para estimar el volumen de gas original y predecir las reservas de gas ante diversos índices. Al igual que los métodos de balance de materia, es necesario que haya habido cierto desarrollo en el proyecto para poder establecer una tendencia.

Como se ha podido ver, los métodos actuales más extendidos para caracterizar una reserva de hidrocarburos en la corteza terrestre son invasivos, al requerir que el proceso de extracción esté en marcha para poder realizar las estimaciones.

El objetivo que persigue el estudio que comenzamos es el de proponer un método fiable para estimar la cantidad de gas atrapado en un entorno, así como determinar de qué gas se trata. A diferencia de los anteriores, el método que buscamos ha de ser no invasivo: no queremos alterar las condiciones de la región de estudio.

Así, el método propuesto se apoyará en el uso de ondas de ultrasonidos emitidas hacia la zona de estudio. Para ello, nos basaremos en los fenómenos que afectan a una onda acústica al impactar contra una nube de burbujas: el gas atrapado dispersa la onda, disminuyendo su intensidad de forma progresiva, hasta que atraviesa completamente el medio de estudio; en cuanto a las burbujas, se producen efectos de difusión del gas atrapado en la burbuja hacia la solución acuosa exterior, disminuyendo de esta forma el volumen de hidrocarburos inicial.

El procedimiento que seguiremos de aquí en adelante para exponer los resultados obtenidos en el laboratorio y las conclusiones que dichos datos nos han aportado será el siguiente: comenzaremos con una introducción teórica al modelo aplicado de dispersión múltiple, además de describir las ondas que intervienen en el sistema; proseguiremos con la exposición de los datos obtenidos, tanto de las mediciones acústicas de la onda resultante a la salida del medio poroso utilizado, como de las estimaciones de volumen de gas que se han realizado de forma óptica. Posteriormente pasaremos a realizar un estudio del problema en el entorno frecuencial, como requiere la teoría ya existente, que nos permitirá definir los parámetros que cierran el estudio: el nivel de atenuación  $\alpha$ , y la fracción de vacío del sistema  $\beta$ .

### 3. Introducción teórica.

El estudio que se quiere realizar acerca de la dispersión acústica que produce un sistema, formado por una matriz polimérica porosa y una nube de burbujas de un determinado gas, sobre una onda sonora emitida a lo largo del eje longitudinal del cubo, conlleva un análisis en profundidad de los fenómenos que ocurren en el interior y su causa.

Una onda acústica que viaja a través de una solución acuosa, encerrada dentro de una cámara a presión, sufre un proceso de atenuación al atravesar un determinado medio poroso, en el cual ha nucleado, de forma natural, un cierto número de burbujas de gas.

El fenómeno que subyace a esta atenuación acústica es lo que se conoce como dispersión múltiple, aplicada en nuestro caso a ondas sonoras. Volveremos sobre esto una vez hayamos realizado un análisis exhaustivo de los resultados experimentales, pero antes es interesante exponer la expresión que nos facilitará el cálculo de la onda de presión dispersada por una burbuja, lo que dará pie a un estudio matricial posterior de las consecuencias de extrapolar esto a una población de burbujas.

Según análisis clásicos de dicha teoría, estableciendo que la onda dispersada por la burbuja  $i$  es consecuencia de la acción de la onda externa  $p_a$  y la onda dispersada por otra burbuja  $j$ , podemos construir, para todo el conjunto de burbujas presentes, la presión de onda total como:

$$\hat{p}(r) = p_a e^{ikz} + \sum_{j \neq i}^N f_{si} (p_a e^{ikz_j} + \xi_j) \frac{e^{ik|r-r_i|}}{|r-r_i|} \quad [1]$$

donde  $f_{si}$  es la función de dispersión de la burbuja  $i$ ,  $k$  es el número de onda,  $z$  la coordenada longitudinal a la onda,  $p_a$  la onda de presión externa aplicada y  $\xi_i$  el efecto de las burbujas del entorno a dicha burbuja  $i$ :

$$\xi_i = \sum_{j \neq i}^N f_{si} (p_a e^{ikz_j} + \xi_j) \frac{e^{ikr_{ij}}}{r_{ij}} \quad [2]$$

La función de dispersión de la burbuja se define a través de la siguiente expresión, que cuantifica las propiedades de la burbuja como agente dispersor y disipador acústico.

$$f_s = \frac{R_0}{(\omega_n/\omega_0)^2 - 1 - i\Gamma} \quad [3]$$

donde se ha requerido de la definición del coeficiente de amortiguamiento  $\Gamma$ .



Este resultado nos permitirá describir el proceso de atenuación que sufre la onda acústica mediante un coeficiente de amortiguación  $\alpha$ , que será expresado a través de la onda medida en cada instante de tiempo, en el espectro frecuencial:

$$\alpha = \frac{1}{L} \log \left( \frac{I_{ref}}{I_L} \right) = \frac{1}{L} \log \left( \frac{|p_{ref}|^2}{|p_L|^2} \right) \quad [4]$$

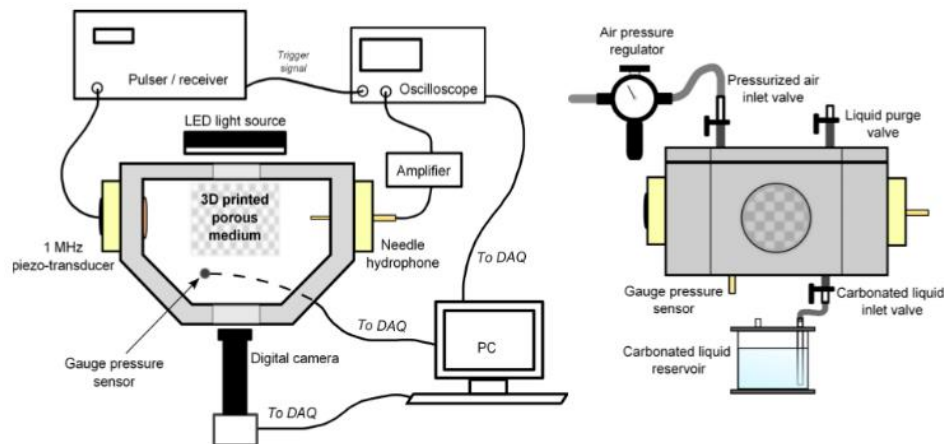
A lo largo del estudio se realizarán cálculos experimentales de este parámetro, y se analizará la fuerte dependencia que esta característica atenuante tiene con la fracción de vacío del sistema,  $\beta$ . Este parámetro nos permitirá describir, en cada instante de tiempo, el volumen de gas que hay atrapado en el interior del medio, en nuestro caso aire.

Esta base teórica nos será de ayuda a la hora de estudiar los resultados obtenidos experimentales con los modelos a escala del medio poroso, y además nos permitirán establecer un modelo teórico en base a simulaciones por ordenador.

#### 4. Materiales y método.

##### a. Set-up y análisis.

En la figura que continúa a este párrafo, Figura 1, se muestra un esquema de la instalación utilizada durante los experimentos:



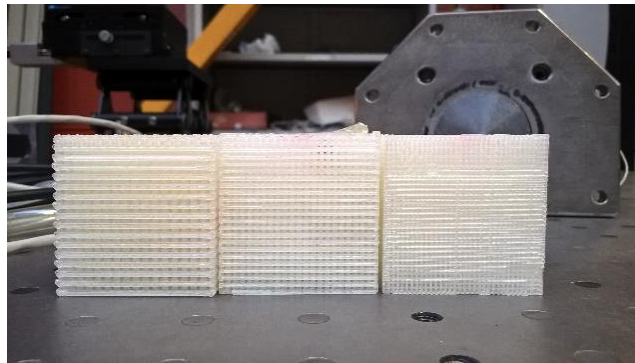
*Figura 1 - Esquema laboratorio*

El transductor (Pulse / receiver) genera un pulso de un ciclo, a 0.5MHz de frecuencia central, que viaja a través de la cámara presurizada, atravesando el medio poroso y alcanzando, finalmente, el hidrófono. Tras éste, una tarjeta de adquisición digitaliza los datos, previamente amplificados, enviándolos al ordenador, que los muestra y almacena en su memoria.

Por otro lado, tenemos el regulador de presión. Este elemento nos permite controlar las condiciones de presión de la cámara, tal y como queremos realizar en nuestros estudios, pero además es clave en los procesos de llenado y vaciado de la misma. Estos dos últimos procesos se realizan al inicio y al final de cada sesión, con ayuda de una serie de válvulas de admisión, situada en la parte superior de la cámara presurizada, y de vaciado, situada en la pared inferior con el fin de facilitar dicho proceso.

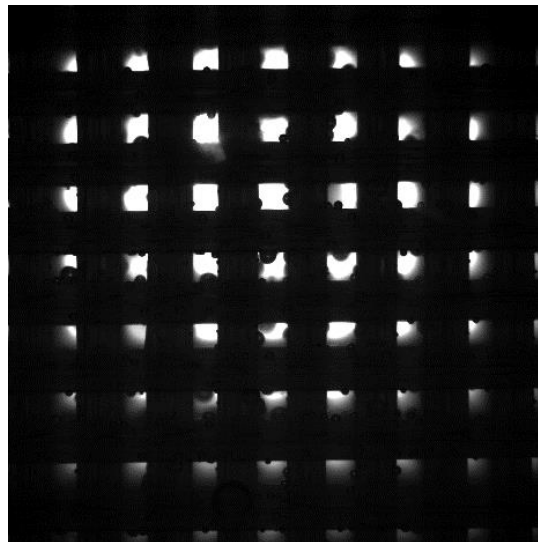
Como último elemento a mencionar, tenemos la cámara de alta resolución, que nos permite realizar capturas del medio poroso con alta definición, pudiendo centrarnos, incluso, en un único poro del medio polimérico. Esto ha sido de gran utilidad en el análisis óptico de la dinámica de la burbuja, como se expondrá en puntos siguientes.

En cuanto al medio poroso, durante los experimentos se han utilizado dos polímeros: Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y poliácido láctico (PLA). Debido a los resultados poco concluyentes que se han podido extraer del PLA, en este análisis nos centraremos en un cubo de ABS, con poros de 0.6, 0.9 y 1.2 milímetros de lado. Estos aparecen en la Figura 2, ordenados de mayor a menor tamaño de poro:



*Figura 2 - Medios poroso utilizados*

Al encontrarse el volumen sólido sumergido en agua saturada de aire dentro de la cámara presurizada, dicho aire formará burbujas en la superficie de los poros. Esta nucleación resultará de especial interés para nuestro estudio, ya que la población de burbujas en el medio será un factor clave en la propagación de las ondas acústicas. En la Figura 3 podemos apreciar dicha población en detalle.



*Figura 3 - Captura frontal del medio poroso*

La onda, al avanzar en la cámara es, en parte, absorbida por el gas, pero otra parte es reflejada, viéndose alterada su dirección. Ambos fenómenos provocan que, al llegar al hidrófono, la señal acústica haya sufrido alteraciones, tanto de forma como de amplitud.

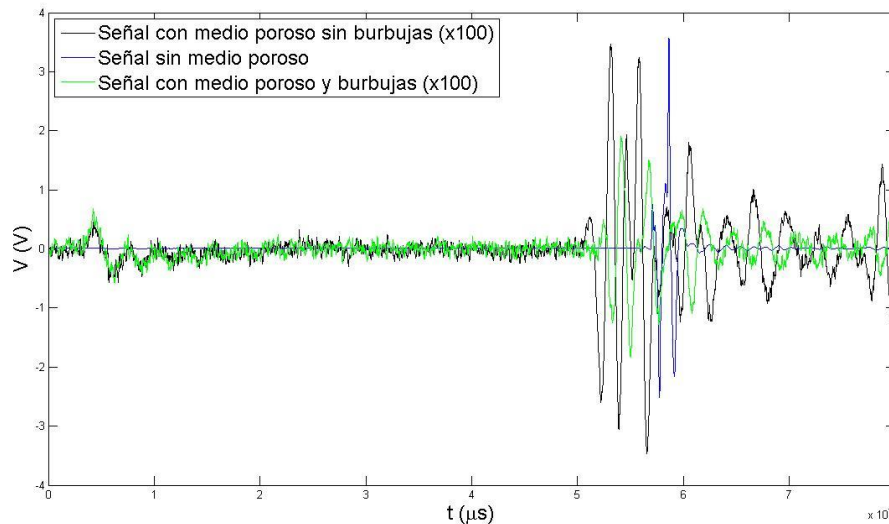


Figura 4 – Señal temporal acústica, para diferentes configuraciones

Nuestra intención es ser capaces de controlar la capacidad de atenuación del conjunto medio-burbujas. Para ello, con ayuda del presurizador, controlamos la presión a la que se encuentra la cabina. Como se ha explicado con anterioridad, al variar este parámetro en el entorno de una burbuja, ésta inicia un proceso de difusión, reduciendo su concentración de gas, a costa de aumentarla en sus alrededores. Esto provoca la reducción de su tamaño, lo que se traduce, en lo que nos atañe, en una reducción de la capacidad del sistema de atenuar la onda sonora emitida.

Con el fin de analizar en qué medida el sistema amortigua la onda sonora, tomaremos como dato característico de la atenuación la amplitud pico-pico de la onda recibida por el hidrófono,  $V_{pp}$ . En la (Figura 5) se muestra una gráfica tipo de la variación de  $V_{pp}$  con el tiempo, ante ciertos golpes de presión:

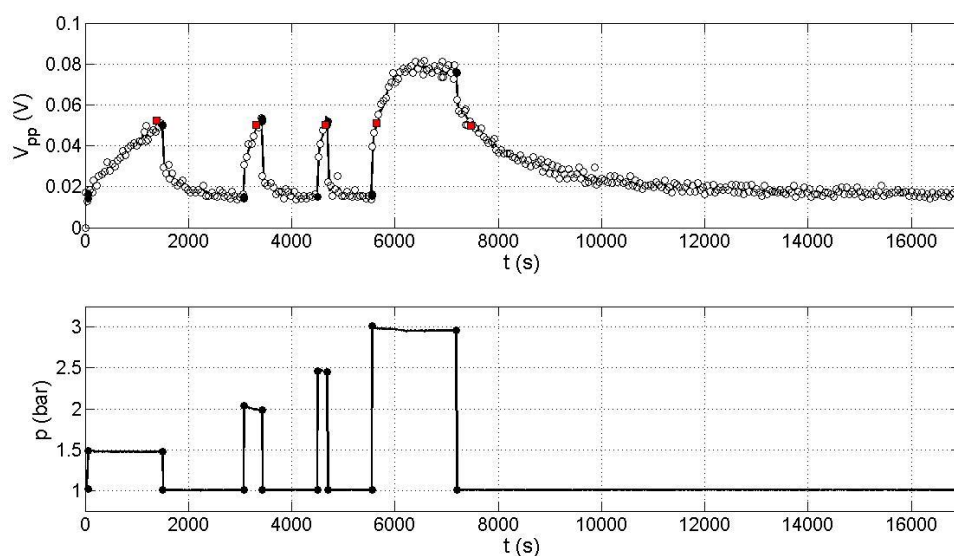
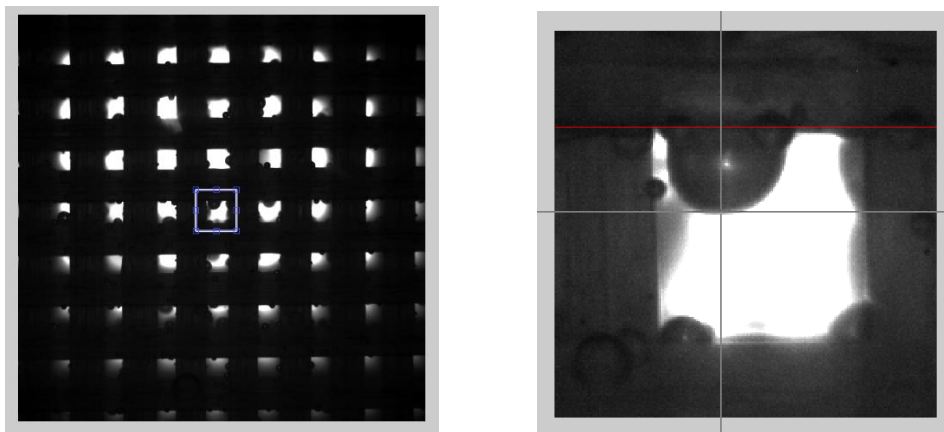


Figura 5 - Amplitud señal acústica (tamaño de poro: 0.9mm)

Por otro lado, será interesante prestar atención a lo que ocurre a nivel de volumen/población de burbujas. Como ya se ha comentado, las variaciones bruscas de presión provocan una reducción notable del radio de las burbujas, lo que se traduce en una bajada del volumen de gas atrapado. Así, mediante una cámara de alta resolución, captamos cierta región del plano visible del medio poroso, (Figura 3). Un estudio del comportamiento del radio de un cierto número de burbujas nos permitirá graficar dicha longitud frente al tiempo, y establecer una relación con  $V_{pp}$ .



*Figura 6 - Método medida del radio de burbuja*

Quedan, de esta manera, expuestos los objetivos finales del estudio que nos atañe: se analizará el comportamiento de disolución y crecimiento de las burbujas de gas atrapado ante cambios bruscos de presión, para lo que haremos un análisis acústico ( $V_{pp}$ ) junto a uno óptico ( $R_{burbuja}$ ); finalmente, se establecerán relaciones entre la fracción de vacío presente en el sistema ( $\beta$ ) y la atenuación que provoca éste en la onda sonora ( $\alpha$ ).

b. Proceso de obtención de datos.

Tras haber configurado cada aparato para el experimento, se enciende el generador de ondas. De esta forma, el osciloscopio empieza a mostrar por pantalla la onda característica que estamos buscando analizar, (Figura 4).

En esta situación, sin haber realizado ningún tipo de experimento invasivo sobre la muestra, la curva que nos muestra el osciloscopio depende de dos aspectos:

- La composición química del fluido utilizado. En el caso del agua, al ser obtenida directamente de la corriente común, su composición variará día a día, variando así la capacidad de formase burbujas en el medio. En el caso del agua carbonatada, influyen el tiempo que lleve en contacto con el aire y el desconocimiento del porcentaje de  $CO_2$  en la misma.
- La configuración de burbujas. Éstas tienden a formarse en intersticios del medio poroso y en impurezas del fluido que se depositen en dicho medio. Sin embargo, aspectos como la velocidad de llenado harán que esta configuración no sea controlable.

Por lo expuesto anteriormente, a pesar de que utilicemos el mismo fluido y el mismo medio poroso, e incluso si controlamos el proceso de llenado de la cámara, hay un componente aleatorio común que hace imposible un control estricto de los parámetros experimentales.

Antes de comenzar a obtener datos, con el fin de estabilizar la muestra y eliminar, en la medida de lo posible, componentes variables, se realizan una serie de calibraciones. Para ello, se eleva la presión a  $2.5\text{bar}$  y se abre la válvula de admisión de la cámara presurizada. Inmediatamente después, se baja la presión progresivamente, hasta alcanzar un valor nulo. Este mismo proceso se repite, hasta que el máximo en la señal, medido con el programa de LabView, no varíe de forma apreciable de una medida a otra.

Una vez el sistema se ha estabilizado, se ajusta la presión que requiera el experimento en cuestión y se inicia la obtención de datos en el programa. Tras dejar que tome una cantidad prudente de medidas (en torno a 100) se abre la válvula de admisión y la cámara queda expuesta a la presión indicada.

A partir de aquí, como se explicará posteriormente, en función del carácter del análisis a realizar, se esperará a que la muestra alcance un nivel máximo que permita recuperar de nuevo las condiciones iniciales al retirar la presión (disolución parcial), o se dejará la exposición hasta que la fracción de gas atrapado sea nula (disolución total).

Durante todo este proceso, el programa recoge los datos recibidos a través del hidrófono y los procesa, tal y como se ha comentado anteriormente, mostrando en pantalla una curva con el voltaje pico-pico de la onda frente al tiempo, además de la presión instantánea.

Una vez se ha alcanzado el propósito, se procede a retirar la exposición del medio a la presión. Para ello, con la válvula cerrada, situamos el presurizador a presión nula (ambiente; 1bar) y abrimos la válvula. De esta forma, en un proceso más o menos lento en función del experimento realizado, comenzará el retorno a las condiciones iniciales o a unas condiciones totalmente nuevas.

Cabe destacar las diferencias que produce el tipo de disolución que se realice en cuanto a las condiciones del sistema. El mantener una cierta presión durante un periodo de tiempo largo, lo que hemos denominado disolución total, persigue la obtención de la amortiguación que produce sobre la onda el propio medio, sin burbujas. A este parámetro, de cara a análisis posteriores a esta descripción, lo denominaremos señal de referencia. La principal característica de esta señal, como hemos mencionado, es la inexistencia de burbujas. Al retirar la presión ejercida, el proceso será totalmente diferente a un crecimiento normal: aparecerán nuevos núcleos, que irán creciendo a medida que avance el tiempo, generando una nueva población de burbujas, con una distribución diferente a la inicial.

Por otro lado, las disoluciones a tiempo parcial se han realizado con el objetivo de medir la velocidad de disolución del gas en el medio acuoso. Por esto mismo, no es interesante tener una exposición prolongada, sino tener una alta cantidad de repeticiones. Por ello mismo, se toma un valor de referencia del  $V_{pp}$  y se corta la presión cuando dicho nivel es alcanzado. De esta forma, la población de burbujas no varía de forma apreciable (existen burbujas pequeñas que puede que desaparezcan completamente, aun así), por lo que el experimento es altamente repetible.

El valor de referencia de  $V_{pp}$  que tomamos como máximo valor alcanzable durante las disoluciones parciales viene dado por el valor que alcanza dicha variable en los golpes de presión realizados durante las calibraciones.

Una vez la sesión ha concluido, se procede a apagar todos los aparatos, a extraer los datos del ordenador y a vaciar la cámara en el depósito. Además, con el fin de evitar el deterioro de los materiales, el interior de dicha cámara es secado, ya que se podrían dar problemas de oxidación de los componentes.

## 5. Análisis de resultados experimentales.

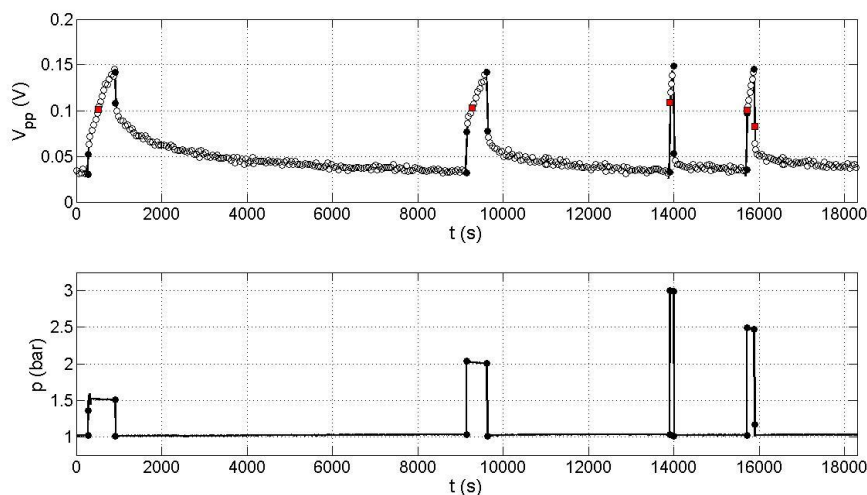
### a. Amplitud de onda en disoluciones parciales y totales.

El primer aspecto fundamental que nos va a permitir caracterizar el comportamiento del medio poroso, como ya se ha comentado en párrafos anteriores, será el voltaje pico-pico,  $V_{pp}$ , de la señal recibida por el hidrófono, la cual es resultado de la señal pura emitida, con la correspondiente atenuación del medio y las burbujas.

De esta forma, será éste el parámetro que dé pie al análisis completo de la atenuación. Se tendrán que comparar dos casos, correspondientes a diferentes tamaños de poro: 0.9 y 1.2mm. Se ha omitido el uso de un tamaño de poro de 0.6 mm debido a que, al tener una densidad de material mucho mayor que los otros dos, inhibe el efecto de las burbujas, siendo los ensayos poco representativos del objetivo perseguido.

Cabe esperar que, si bien la forma de las gráficas no es intuitiva, la escala del voltaje sea diferente para cada tamaño de poro. A menor tamaño, teniendo en cuenta que las medidas del cubo poroso son constantes, mayor será la densidad de material plástico, por lo que la obstrucción al paso del sonido será mayor, y viceversa.

Esto se puede ver claramente en las curvas características de  $V_{pp}$  para cada sistema, mostradas en las Figura 5 y Figura 7:



*Figura 7 - Amplitud señal acústica (tamaño de poro: 1.2mm)*

Como se puede apreciar, cuando el voltaje final para la disolución total del ABS de 0.9mm apenas alcanza 0.06V, las disoluciones parciales para 1.2mm se cortaron a 0.15V.

Otra escala que es analizable es el tiempo. Mientras que para un tamaño pequeño de poro las disoluciones y recuperaciones son lentas (2000 segundos para un golpe de presión de 0.5bar), para uno más grande son significativamente más rápidas (menos de 500 segundos en el mismo caso).



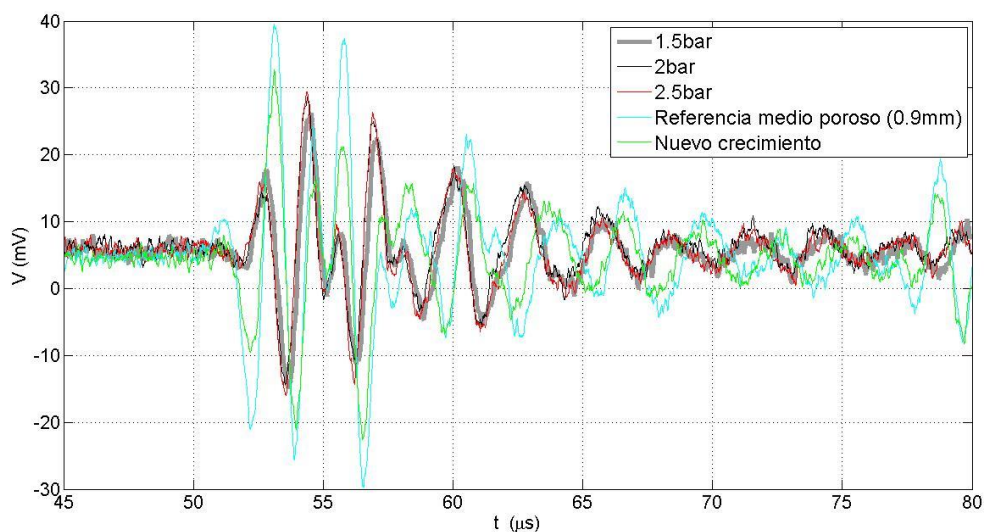
b. Análisis óptico. Evolución del radio.

Tal y como hemos comentado, el causante principal de la atenuación que se observa en estos experimentos es el gas atrapado en el medio. Estas burbujas, que se forman en las cavidades de los poros, distorsionan las ondas sonoras, absorbiendo parte de su energía y dispersándolas en diversas direcciones.

Para estudiar más en detalle el efecto del gas, se ha realizado un análisis de imagen, centrándose en una burbuja de la primera cuadrícula de poros que se ve desde fuera de la cavidad, y estudiando su comportamiento con respecto al tiempo. De esta forma, se ha medido una cierta longitud característica de cada burbuja, que podremos aproximar como el radio.

Como veremos en apartados posteriores, será posible, e interesante, establecer una relación entre el ritmo de crecimiento o decrecimiento de sendos parámetros  $V_{pp}$  y  $R$  según las condiciones de presión exterior que se impongan.

c. Señal acústica en distintos tiempos.

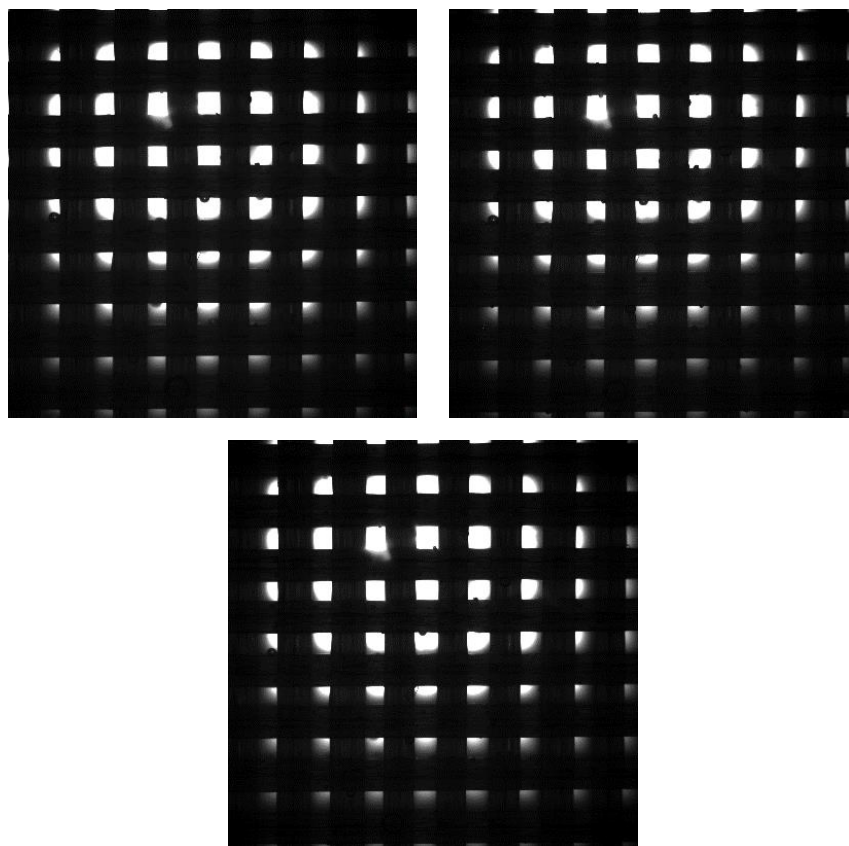


*Figura 8 - Señal temporal acústica a diferentes presiones*

Ya hemos comentado anteriormente que el fin que persigue realizar las disoluciones parciales es permitirnos medir el ritmo de disolución de una burbuja, sin alterar de manera irreversible las condiciones del medio. La Figura 8 muestra la señal acústica recibida por el hidrófono en diferentes tiempos, de forma que el  $V_{pp}$  sea igual, entre los cuales cambia, únicamente, la presión ejercida.

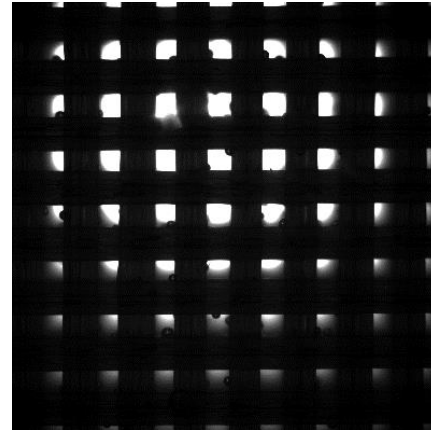
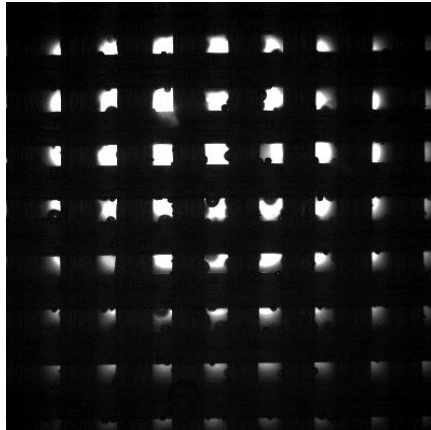
Como podemos observar, las señales correspondientes a las semi-disoluciones son idénticas en forma y amplitud. Sin embargo, la señal de referencia del medio poroso, que se toma a 3bar de presión y cuando la disolución ya se ha completado, vemos que cambia en ambos sentidos. Además, si tomamos una nueva señal cuando ya hemos retirado la presión externa y ha pasado cierto tiempo, vemos que la señal no recupera la forma que tenía en las condiciones iniciales. Este comportamiento, como ya se ha comentado, es debido a que, al perder completamente la población de gas en el medio, no podremos volver a recuperar la distribución de burbujas que teníamos, debido al componente aleatorio que este parámetro conlleva.

Se muestran a continuación tres capturas del medio poroso, correspondientes a las diferentes disoluciones a 1.5, 2 y 2.5 bares, respectivamente.



Tal y como se puede ver, a pesar de existen pequeñas variaciones de tamaño en la tercera disolución, la población de las burbujas es prácticamente la misma. Esto corrobora lo ya comentado en cuanto a las disoluciones parciales.

Sin embargo, esto no sucede cuando se realiza una disolución total, lo que queda representado en el siguiente par de imágenes. La figura de la izquierda muestra la distribución de gas atrapado al inicio del experimento, mientras que la de la derecha está realizada cierto tiempo después de terminar la disolución total a 3bar, cuando se aprecia cierto crecimiento de núcleos. Como vemos, la distribución final es completamente diferente a la inicial.



d. Comprobación de proceso isoterma.

Uno de los aspectos que resulta más interesante de comprobar, de forma complementaria al estudio, es que se cumple la condición de proceso isoterma:

$$pV = nR_gT = cte \rightarrow pR^3 = cte \quad [ 5 ]$$

Así, en vista de los parámetros que manejamos en los experimentos, buscamos que se cumpla la igualdad mostrada en la Ecuación 6:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^3 \quad [ 6 ]$$

De esta forma, tomamos medida tanto de la presión como, gracias al análisis óptico, de la longitud característica de una burbuja antes y después de cada uno de los saltos de presión realizados en cada experimento, obteniendo las series de puntos mostrados en la Figura 9 y Figura 10.

Como vemos en dichas gráficas, la relación no se cumple: en el caso de un tamaño de poro de 0.9mm, la relación tiene asociado un coeficiente de 2.7, mientras que para el de 1.2mm dicho coeficiente es de 0.78. La teoría dice que, para poder considerar el proceso como isoterma, no debe existir ningún factor de escala en la relación. Sin embargo, no podemos asegurar que el proceso no sea a temperatura constante, ya que, como bien hemos podido observar en las imágenes obtenidas por la cámara, las burbujas están confinadas entre las paredes del medio polimérico, y adheridas a las mismas, por lo que los cambios de presión no son tan apreciables desde su perspectiva.

Cabe añadir, como conclusión a los datos obtenidos, que el tamaño de poro influye en el efecto de la presión en el tamaño de la burbuja: a medida que la longitud del poro es menor, estos efectos se notan menos que para un poro de mayor tamaño. Esto se debe a que la cantidad de material es mayor con un poro de 0.9mm que con uno de 1.2, y, por tanto, aísla más el gas.

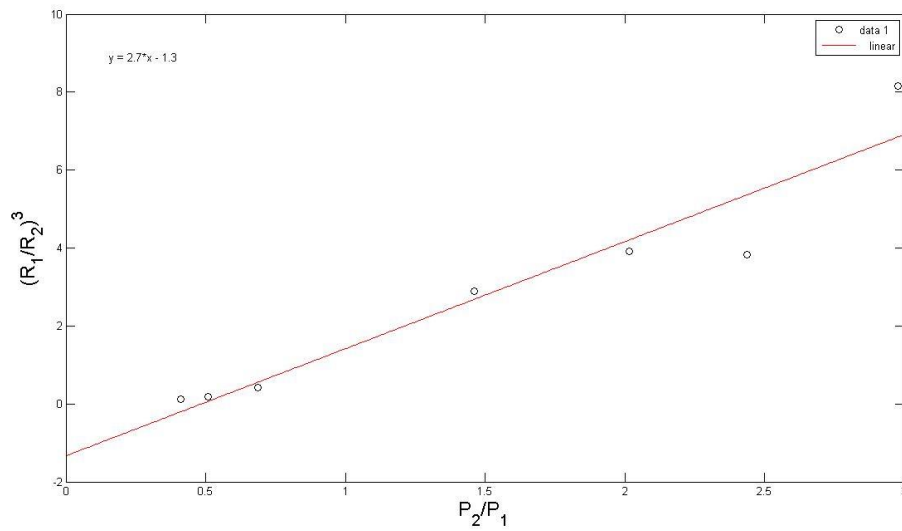


Figura 9 - Relación isoterma (0.9mm)

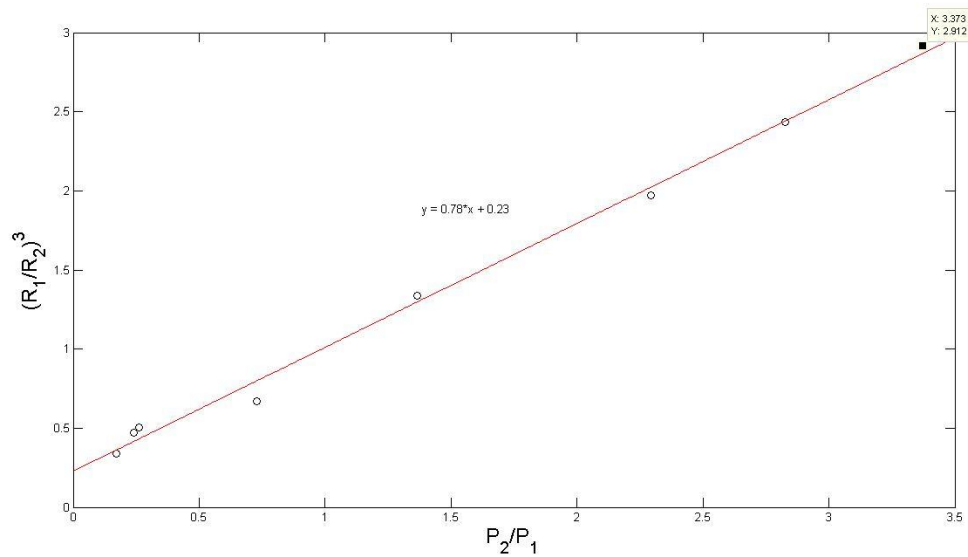


Figura 10 - Relación isoterma (1.2mm).

e. Ritmo de disolución y crecimiento.

Otro de los aspectos que resulta de gran interés a la hora de realizar un estudio de este tipo, es medir el ritmo con el que una burbuja se difunde al estar sometida a una presión externa, y cómo afecta el nivel de dicha presión al mismo. La expresión que gobierna este tipo de sucesos tiene la siguiente forma:

$$\frac{dR^3}{dt} = f_1(A, D, k_H) * f(\Delta P) \quad [7]$$

donde  $R$  es el radio de la burbuja en cuestión,  $\Delta P$  el salto de presión y  $f_1$  es una función del área de difusión de la burbuja,  $A$ , la difusividad del gas en el medio,  $D$  y la constante de Henry,  $k_H$ . En las figuras Figura 11 y Figura 12 se muestra la evolución del parámetro normalizado  $(R_0/R)^3$  frente al tiempo:

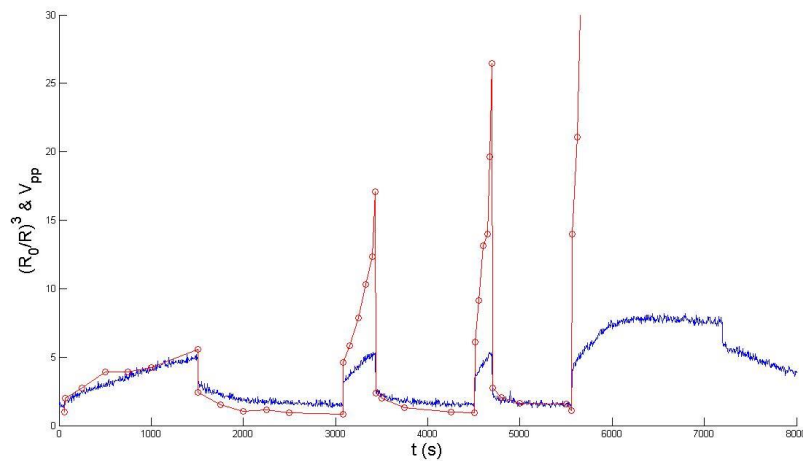


Figura 11 - Volumen normalizado y Amplitud de la señal acústica (0.9mm).

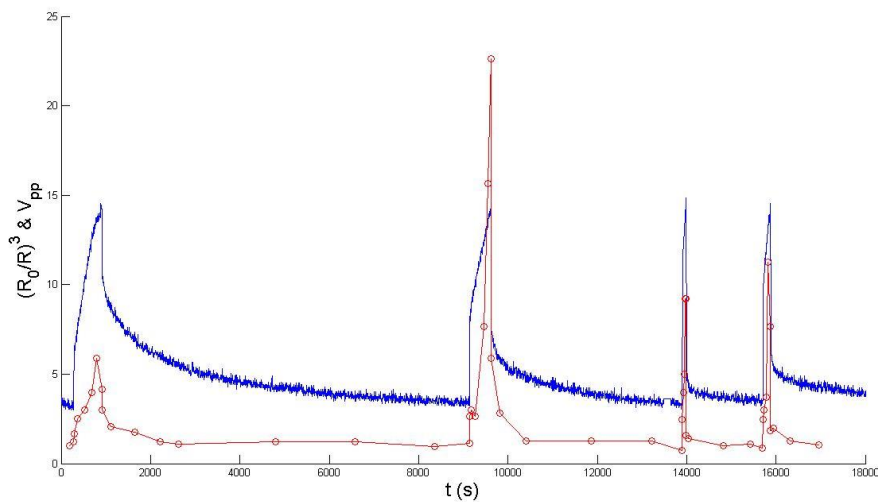
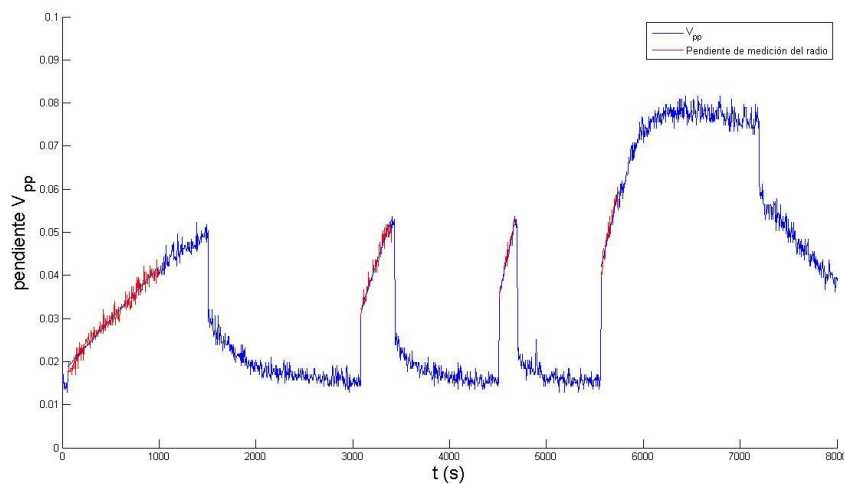


Figura 12 - Volumen normalizado y Amplitud de la señal acústica (1.2mm)

Se ha superpuesto en dichas figuras la evolución del voltaje característico frente al tiempo. Tal y como se puede observar, ambos parámetros tienen un comportamiento similar. Así, vemos, como adelantábamos en párrafos anteriores, que es posible establecer una relación directa entre la amortiguación de la señal acústica y las variaciones de volumen de gas.

Cabe destacar que, para realizar un análisis visual, se ha utilizado la normalización  $R_0/R$  para el radio de la burbuja. De esta forma, al avanzar en la disolución el tamaño de burbuja se hará menor y, por tanto, el cociente descrito aumentará.

Para ello tomaremos las siguientes regiones de la onda para medir las variaciones de la amplitud de la onda (para las variaciones de volumen tomaremos las pendientes correspondientes, en el tiempo, en las gráficas de  $R(t)$ ):



*Figura 13 – Pendientes*

Tomando los intervalos de valores mencionados obtenemos las siguientes representaciones: la Figura 15 y Figura 17 corresponden a las pendientes de  $V_{pp}$  contra la presión, mientras que la Figura 14 y la Figura 16 corresponden a las de  $R$ .

Como podemos observar, el comportamiento del ritmo de difusión del gas encerrado puede aproximarse como exponencial con la presión impuesta, de igual forma que se puede hacer con la amplitud de la señal sonora recibida en el hidrófono. Esto indica que ambos parámetros varían de igual forma ante el mismo incremento de presión.

Así, concluimos que, efectivamente, existe una fuerte relación entre la atenuación que produce un medio poroso poblado de burbujas de aire y el tamaño de dichas burbujas.

En el capítulo siguiente se hará una evolución más en detalle de dicha relación, haciendo uso de parámetros como la fracción de vacío del cubo presente en el sistema medio-gas,  $\beta$ , y el coeficiente de atenuación del sistema,  $\alpha$ .

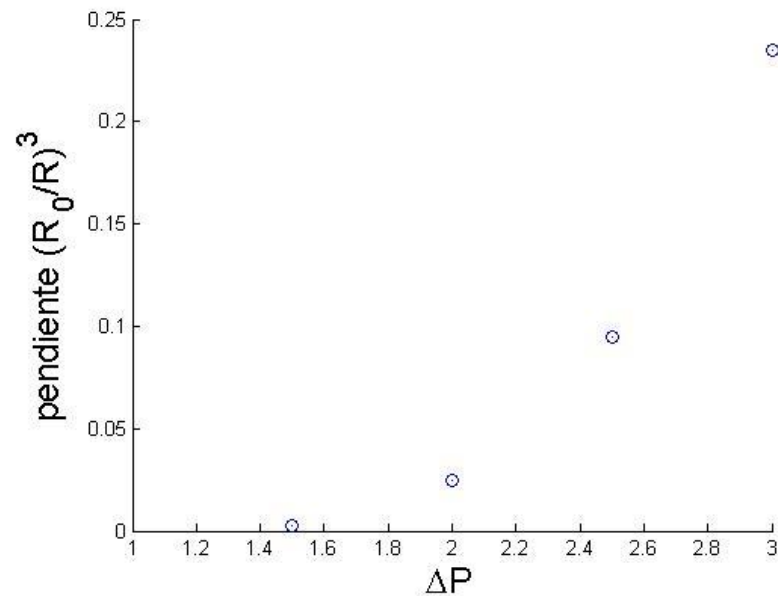


Figura 14 - Pendientes del Volumen normalizado frente a la presión (0.9mm)

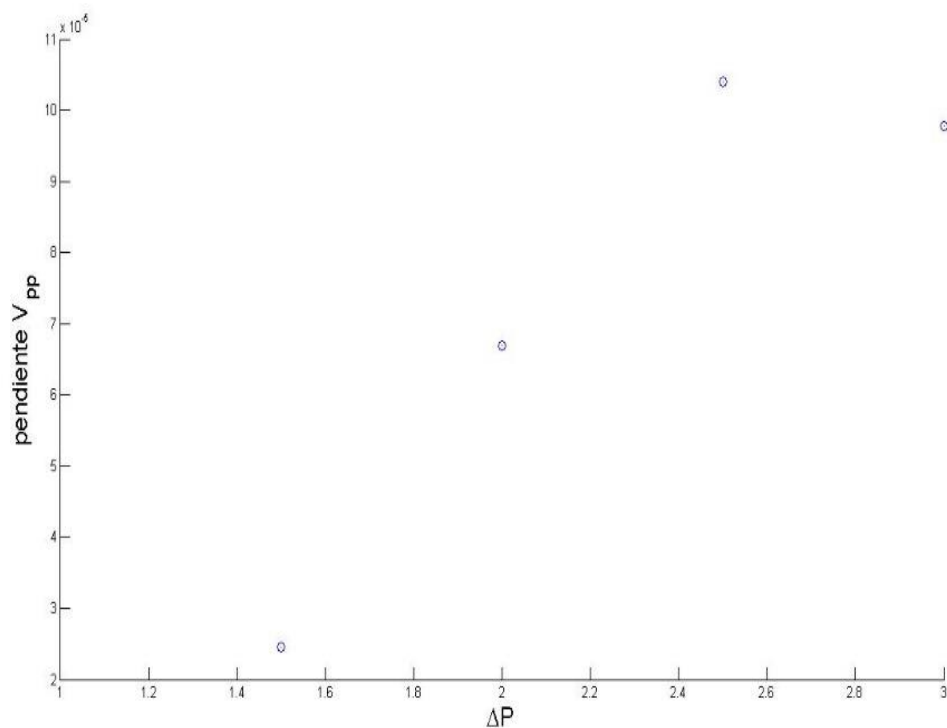


Figura 15 - Pendientes de la Amplitud acústica frente a la presión (0.9mm)



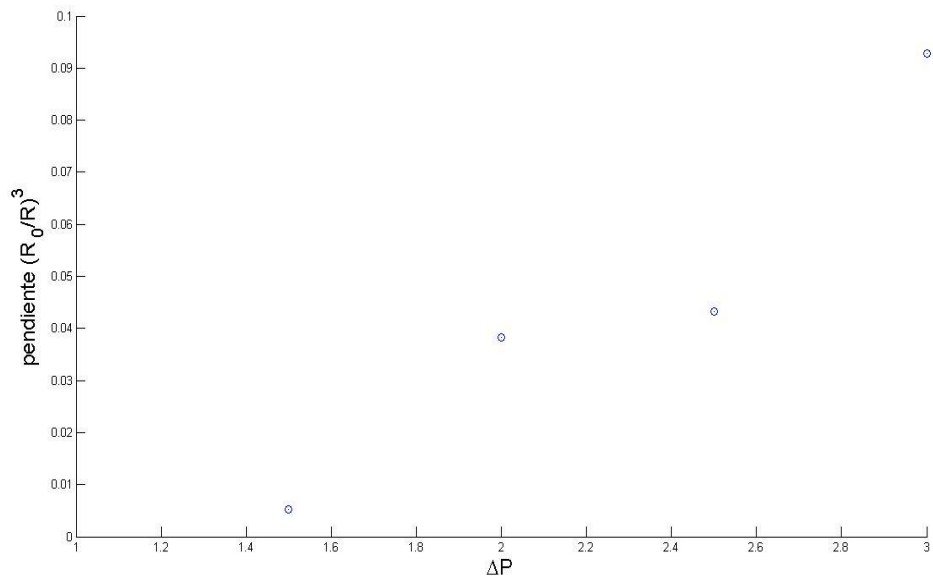


Figura 16 - Pendientes del Volumen normalizado frente a la presión (1.2mm)

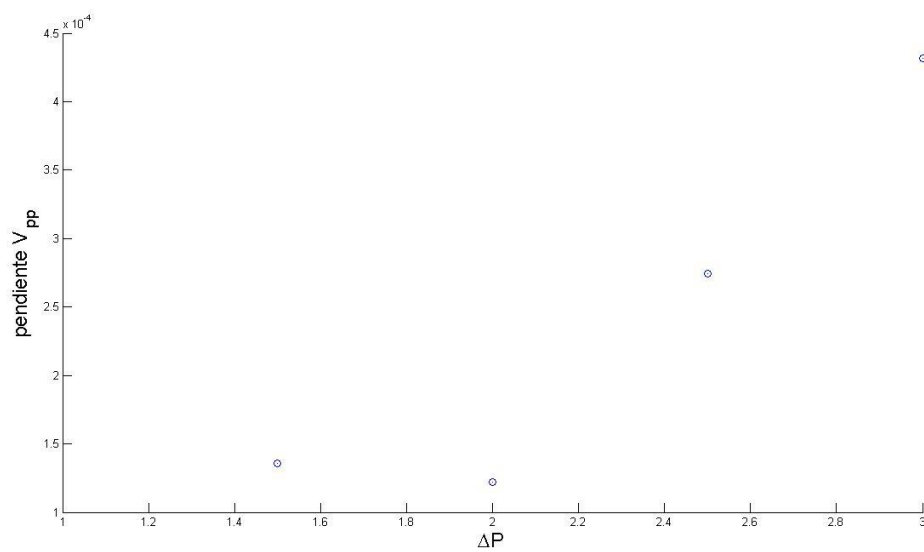


Figura 17 - Pendientes de la Amplitud acústica frente a la presión (0.9mm)

## 6. Análisis frecuencial.

Una vez obtenidos todos los datos experimentales y realizados los oportunos análisis sobre los mismos y su relación con el experimento real, pasaríamos a establecer un modelo teórico, que apoye los resultados obtenidos y tengamos, de esta forma, un ciclo cerrado de estudio.

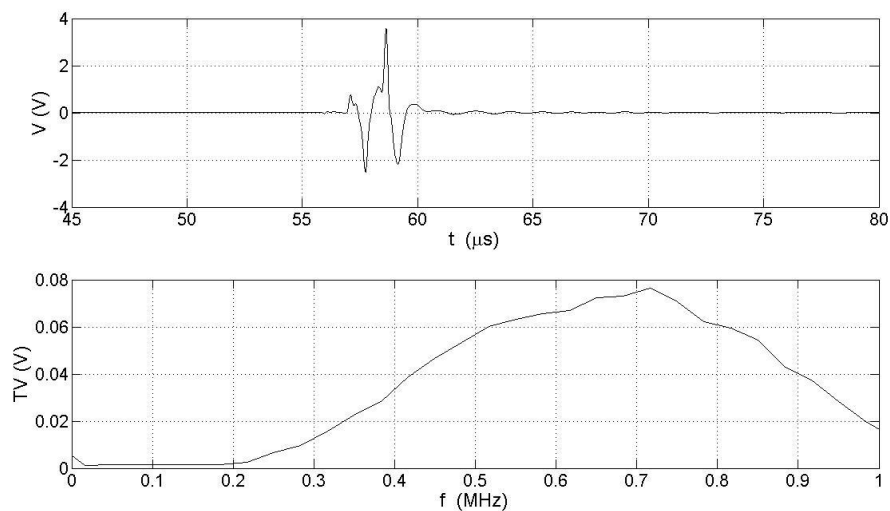
Sin embargo, a la hora de realizar modelización teórica, es muy usual tratar los parámetros del sistema en el dominio de las frecuencias, y no de manera temporal. Los análisis realizados a día de hoy sobre tratamiento y propagación de ondas en distintos medios se realizan con modelos espectrales, por lo que es necesario, si queremos enfocar nuestros resultados, que se haga una conversión de los parámetros empleados hasta ahora o, en su defecto, se expongan otros que los sustituyan en concepto.

Otro aspecto que hace especialmente interesante abordar un estudio en frecuencias de los experimentos es el hecho de analizar la dinámica de las burbujas presentes. Nos permitiría, si así lo quisiéramos, estudiar posibles fenómenos de resonancia de los núcleos, y expresarlos como función de las variables que definen nuestro sistema.

En definitiva, un análisis en el entorno temporal del comportamiento del sistema frente a ciertas variables es un método muy visual, que permite sacar, de forma intuitiva, conclusiones válidas sobre los experimentos. Sin embargo, a la hora de exponer un método teórico que nos sirva de base para otros ensayos de la misma índole, y así poder extrapolar los resultados, es necesario realizar un cambio al entorno de las frecuencias, ya que resulta ser un método muy versátil y que permite entrar en profundidad en los fenómenos que intervienen en el desarrollo de la onda sonora a través del medio.

a. Sistema espectral.

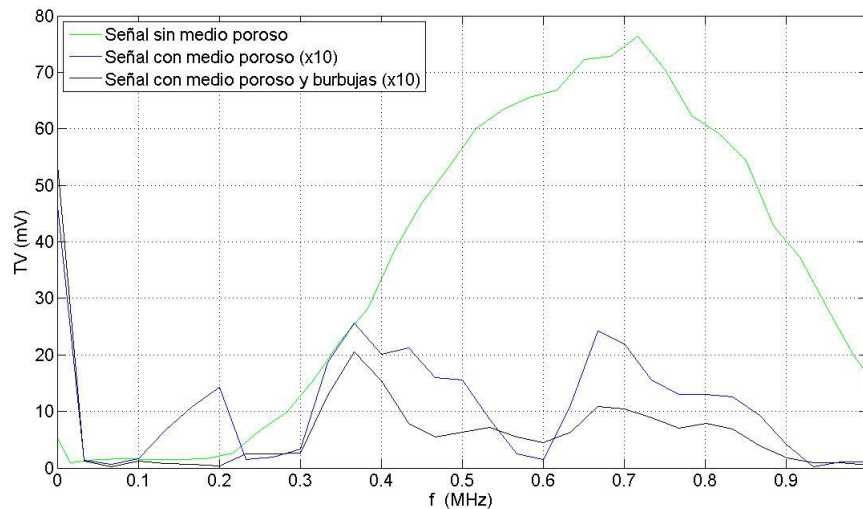
Como se comentó al principio de esta memoria, la onda sonora que nos proporciona el generador, es un pulso de 0.5MHz. Con este parámetro fijado, se esperaba que el espectro de frecuencias de la onda recibida por el hidrófono, sin contar con medio poroso que la atenúa, solo la solución acuosa, fuera una campana en torno a 0.5, ya que contamos con que estamos tratando con aparatos electrónicos con cierta tolerancia. Sin embargo, y tal como se muestra en la Figura 18, existe una desviación en la onda, que sitúa el centro del ancho de banda en los 0.7MHz.



*Figura 18 - Señal temporal y frecuencial transmitida en agua*

Debido a lo incierto del fenómeno, se ha optado por tratarlo como una desviación del propio generador de ondas, por lo que se tomará como frecuencia central los 0.7MHz, y se estudiarán las frecuencias entre 0.4 y 0.9MHz para el análisis espectral que prosigue.

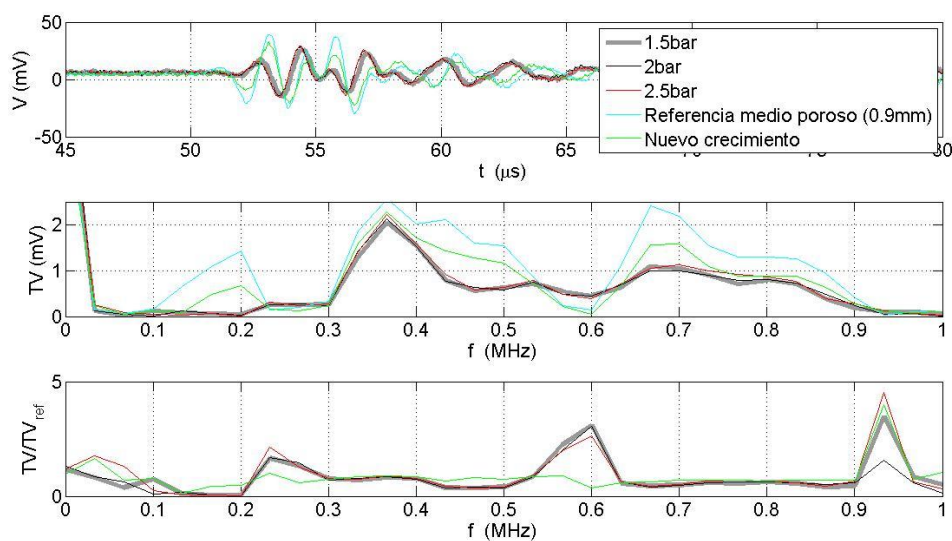
En la Figura 19, las curvas de atenuación frente a la frecuencia, para distintas combinaciones dentro de la cámara presurizada:



*Figura 19 - Señal frecuencial acústica, para diferentes configuraciones*

Como cabía esperar, la señal obtenida sin medio poroso que obstaculice el desplazamiento de la onda es apreciablemente más grande. De hecho, cabe destacar que los otros dos espectros, correspondientes a la señal con medio poroso y a la señal con medio poroso y población de burbujas en su interior, se han tenido que escalar con un factor 10 para poder realizar la comparativa que se muestra.

Una vez identificadas las formas características de los análisis a realizar, pasamos a aplicar dicho método a los casos de interés.



*Figura 20 - Señal frecuencial acústica a diferentes presiones*

b. Parámetro de atenuación.

Tal y como hemos comentado anteriormente, el parámetro que da pie a la descripción que se ha realizado de la atenuación de la onda sonora transmitida, es la amplitud máxima de la misma, definida como  $V_{pp}$ . Sin embargo, este parámetro ha sido expresado como una función del tiempo, por lo que necesitamos de otra variable que nos permita describir el comportamiento de la onda sonora a partir del dominio de las frecuencias.

De esta forma definimos el parámetro de atenuación  $\alpha$  a través de la siguiente expresión:

$$\alpha(t) = \frac{1}{L_p} \cdot \log \left( \frac{|\hat{V}_{ref}(t)|^2}{|\hat{V}(t)|^2} \right) \quad [8]$$

En la Ecuación [6],  $L_p$  es la longitud del poro considerado,  $\hat{V}$  es la señal de voltaje en el espectro frecuencial, y  $\hat{V}_{ref}$  es la señal de voltaje frecuencial máxima, esto es, la que caracteriza al medio poroso en cuestión. Ambos voltajes se han elegido para una determinada frecuencia, por lo que el resultado será una curva de  $\alpha$  frente al tiempo para cada frecuencia escogida.

Será, pues, un parámetro determinante si queremos caracterizar el comportamiento de la población de gas nucleado, ya que es un reflejo del efecto que éste tiene sobre la onda emitida.

En las figuras escogidas a continuación, Figura 21 (y figura), se muestra el comportamiento del factor  $\alpha$  de atenuación, mostrado para diferentes frecuencias, a lo largo del tiempo. Podemos observar las variaciones que sufre ante los golpes de presión que se han realizado durante los experimentos.

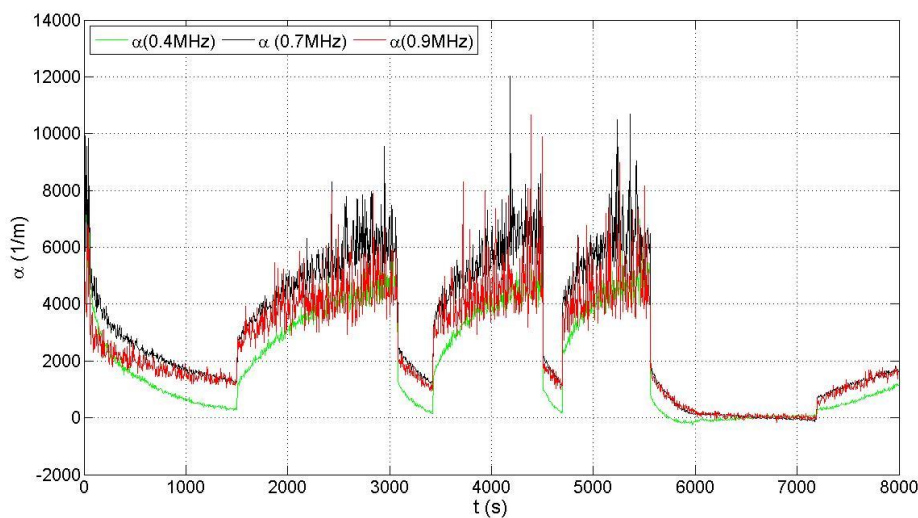
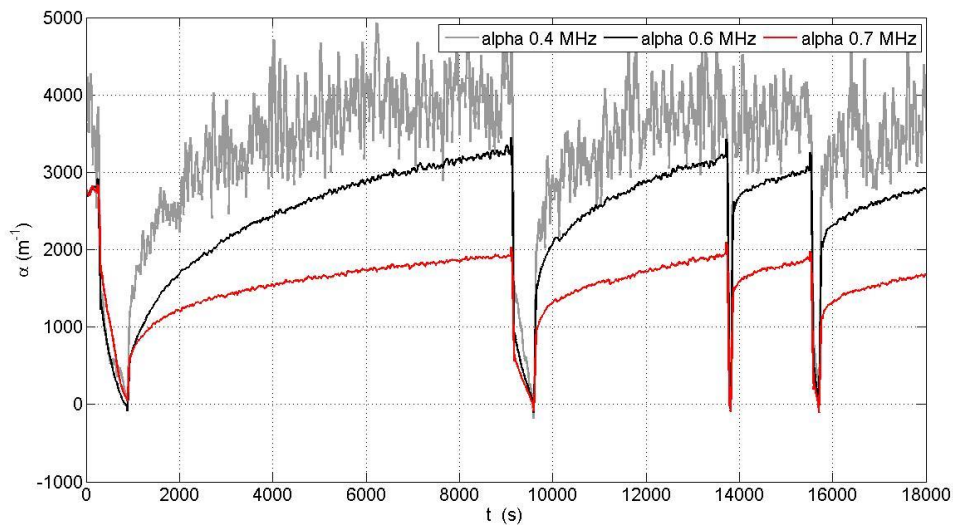


Figura 21 - Parámetro de atenuación a diferentes frecuencias (Poro de 0.9mm)



*Figura 22 - Parámetro de atenuación a diferentes frecuencias (Poro de 1.2mm)*

El comportamiento es el esperado: cuando nos encontramos en zonas de disolución (tiempos en los que el sistema está expuesto a una sobrepresión) la difusión provoca que la población de burbujas decaiga, arrastrando consigo el término de atenuación sonora. Una vez se retira el golpe de presión, las burbujas recuperan su estado inicial, y así lo hace también el índice  $\alpha$ .

Si nos centramos en comparar el comportamiento atenuante frente al tamaño del poro, observamos que  $\alpha$  tiene valores muy inferiores para un tamaño de poro mayor. Si vemos la definición de del parámetro de atenuación (Ecuación 8), resulta evidente: el mayor tamaño de poro provoca que la señal acústica se transmita mejor, por lo que los valores que toma el vector  $\hat{V}(t)$  son grandes, lo que hace que el que el coeficiente disminuya.

Además, vemos que este comportamiento no depende de la frecuencia, ya que las tres curvas mantienen la forma. Queda confirmado, de esta manera, que la atenuación que sufre la onda sonora depende en poca medida de la frecuencia que estudiemos.

c. Fracción de vacío.

Hasta ahora hemos estado utilizando como parámetro caracterizador del volumen de gas contenido en el sistema el radio de una burbuja, medido a través de imágenes de la pared visible del medio poroso, y con un algoritmo en Matlab que nos permite definir una longitud característica de la misma, a través de la cual estimamos el volumen. Sin embargo, ante un caso real, el uso de una única burbuja no es representativo. En vista de esto, utilizaremos un parámetro muy común al tratar con sólidos porosos sumergidos: la fracción de vacío,  $\beta$ , definida por la Ecuación 9:

$$\beta = N_{burbujas} \cdot \frac{V_i}{N_{poros} \cdot V_{poro}} = \frac{N_b}{N_p} \cdot \frac{\left(\frac{4}{3}\pi R_b^3\right)}{L_p^3} \quad [9]$$

De tal forma que  $\beta$  expresa el porcentaje de aire dentro del medio poroso. Nos permitirá adaptar el problema unitario a un problema real, con una población de burbujas determinada. Para el estudio que nos atañe se ha considerado una media de 3 burbujas por poro, y se ha medido una cantidad de 729 poros en todo el volumen del cubo (9x9x9 poros).

Tal y como hemos visto anteriormente, para cada experimento hemos definido el radio de la burbuja escogida como una función del tiempo. Esto implica que la fracción de vacío será un parámetro, a su vez, variable con el tiempo:

$$\beta(t) = cte \cdot R_b^3(t) \quad [10]$$

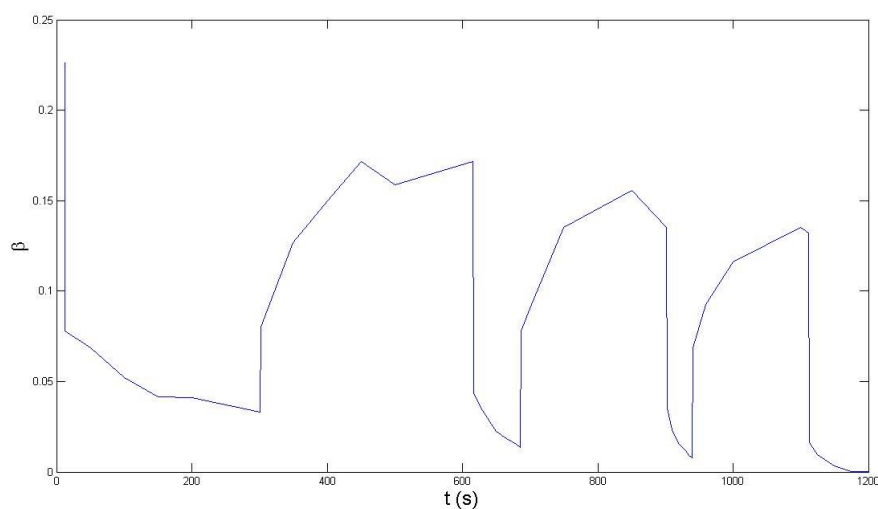


Figura 23 - Fracción de vacío del sistema

En vista de los resultados experimentales mostrados en la figura superior, y apoyándonos en la Ecuación 10, comprobamos que, a medida que las condiciones de presión en la cámara son más exigentes, el radio de las burbujas se ve afectado, decreciendo su valor y disminuyendo, por tanto, el volumen de gas encerrado en el medio y la fracción de vacío del sistema.

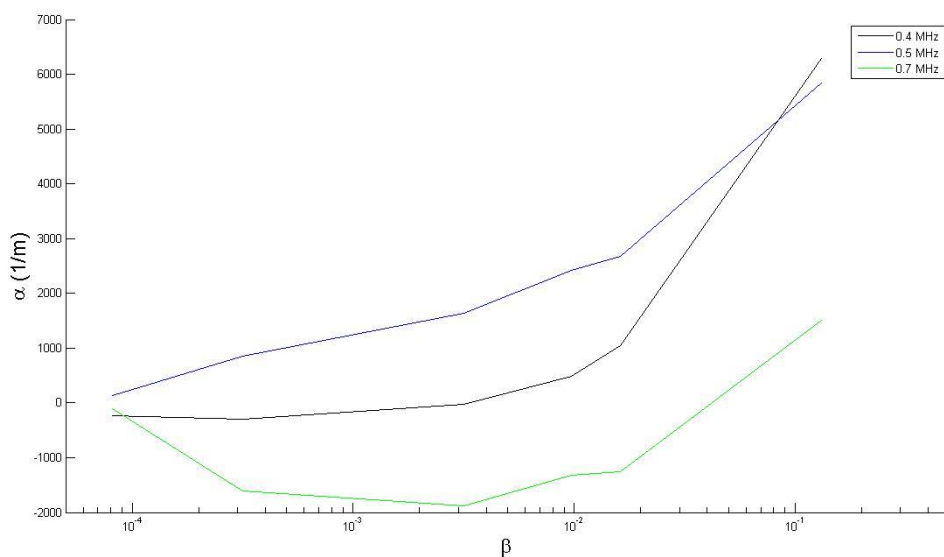
De igual manera que hicimos para la descripción de la curva  $\left(R_0/R\right)^3$  frente al tiempo, podemos ver la similitud, en cuanto a forma, de la curva superior y la gráfica que describe la variación de la amplitud de la onda. El comportamiento de la atenuación del sistema sobre la onda está ligado, de forma natural, a la densidad de gas atrapado que tenemos en el medio poroso.

Esto último quedará expuesto en el siguiente punto, y dará pie a la realización de simulaciones por ordenador y al cierre de un modelo teórico sobre el que sostener los resultados.



d. Atenuación frente a fracción de vacío.

Como hemos mencionado en el párrafo anterior, la dependencia que existe entre la atenuación de la onda y la cantidad de burbujas nucleadas en el medio es fuerte. En la Figura 24 se muestra la variación de la atenuación, a medida que la fracción de vacío presente en el medio cambia:



*Figura 24 - Parámetro de atenuación frente a la Fracción de vacío*

A medida que la fracción de vacío  $\beta$  va decreciendo por el efecto de difusión de las burbujas ante la presión, la capacidad de atenuación del sistema cubo-gas se ve significativamente reducida.

De esta forma queda cerrado el estudio experimental. Hemos comprobado que existe una altísima dependencia del comportamiento de la onda con la población de burbujas de un determinado gas que existe en un medio.

## 7. Modelo teórico.

Tras haber realizado todo un estudio cualitativo de los fenómenos observados en los experimentos, haciendo uso de diferentes parámetros característicos de esta clase de sistemas, como son la amplitud de onda  $V_{pp}$ , el coeficiente de atenuación  $\alpha$  o la fracción de vacío  $\beta$ , estudiaremos a continuación el problema de la propagación de ondas acústicas en una nube de burbujas. Una vez obtenida una solución, haremos un análisis del efecto de la población de burbujas en la atenuación total del sistema.

Como hipótesis de partida, asumiremos que el efecto de la matriz rígida de polímero poroso utilizada no participa, a nivel acústico, en el problema. Es decir, la atenuación que provoca dicho componente está siempre presente, independientemente del tamaño y la población de burbujas. Este nivel de fondo ya ha sido estudiado y caracterizado para cada tamaño de poco, y usualmente ha sido llamado nivel de referencia.

La suposición mencionada implica que todas las variaciones en la onda que se han medido en el laboratorio se deberán exclusivamente a la variación de la ya mencionada fracción de vacío que posea el sistema cúbico, a lo largo del tiempo.

Nos basaremos, por tanto, en la teoría de dispersión múltiple, aplicada a ondas sonoras. Dicha teoría menciona que una burbuja aislada, con un radio determinado e inferior a la longitud de onda del sonido emitido, realizará oscilaciones radiales provocadas por la acción de la presión acústica  $p_a$  del entorno. La Ecuación 11, desarrollada por Rayleigh-Plesset, nos describe dicha dinámica oscilatoria:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{1}{\rho_\infty}(p_A - p_\infty) + \frac{1}{\rho_\infty}\left[p_{g0}\left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3\kappa} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu_E\dot{R}}{R}\right] \quad [11]$$

donde el subíndice  $\infty$  hace referencia a las propiedades de equilibrio del líquido,  $p_{g0}$  es la presión del interior de la burbuja,  $\sigma$  la tensión superficial,  $\kappa$  es el índice politrópico del aire y  $\mu_E$  el coeficiente de disipación térmica.

Debido a estas vibraciones, la burbuja emite a su vez una onda acústica esférica, definida en el régimen lineal de pequeñas oscilaciones por la expresión:

$$p_s = \frac{\rho_\infty}{r}\left[R^2(\tau)\ddot{R}(\tau) + 2R(\tau)\dot{R}^2(\tau)\right] \quad [12]$$

donde  $\tau$  representa la variable temporal y  $r$  la coordenada radial, con origen en el centro de la burbuja.

Linealizando la Ecuación 11 y la Ecuación 12, y realizando un análisis espectral, obtenemos la expresión de la presión acústica que caracteriza la onda dispersada, de frecuencia  $\omega_0$ :

$$\hat{p}_s = \frac{R_0 p_a}{\left(\omega_n/\omega_0\right)^2 - 1 - i\Gamma} \cdot \frac{e^{ikr}}{r} \quad [13]$$

donde, de nuevo, definimos  $\omega_n$  como la frecuencia natural de la burbuja (*Frecuencia de Minnaert*),  $\Gamma$  como el coeficiente de amortiguamiento (de valor próximo a 0.01) y  $k$  como el número de onda.

A partir de la Ecuación 13 se define, finalmente, la función de dispersión de la burbuja:

$$f_s = \frac{R_0}{\left(\omega_n/\omega_0\right)^2 - 1 - i\Gamma} \quad [14]$$

El parámetro  $f_s$  cuantifica las propiedades de la burbuja como agente dispersor y disipador del sonido. A continuación, veremos cómo extrapolar este resultado teórico a una población de burbujas, aplicándolo a la mencionada teoría de dispersión múltiple.

En la Figura 25 se ve el fenómeno que queremos estudiar de dispersión múltiple:

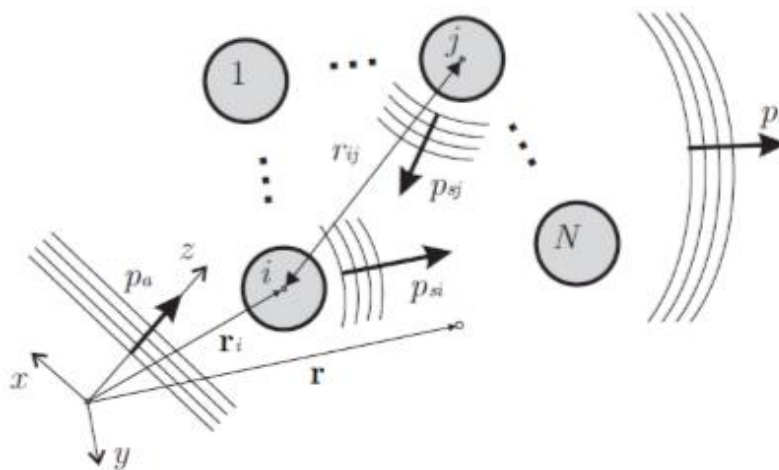


Figura 25 - Esquema del Modelo de Dispersión Múltiple

Así, estudiaremos las características del fenómeno acústico que genera una nube compuesta de  $N$  burbujas, ante una excitación externa  $p_a$  que incide sobre ella. Como cabe esperar, las oscilaciones esféricas antes mencionadas que genera una burbuja ante la excitación, afectarán a la dinámica de los núcleos cercanos. De esta manera, en el seno del campo de burbujas existirá lo que se conoce como dispersión múltiple. Por linealidad, la onda total que dispersa la población de burbujas será la suma de las dispersiones individuales:

$$p_s = \sum_{i=1}^N p_{si} \quad [15]$$

Según análisis clásicos de dicha teoría, estableciendo que la onda dispersada por la burbuja  $i$  es consecuencia de la acción de la onda externa  $p_a$  y la onda dispersada por otra burbuja  $j$ , podemos construir:

$$\hat{p}_{si}(r) = f_{si} e^{-ikz_i} (p_a e^{ikz_i} + \xi_i) \frac{e^{ik|r-r_i|}}{|r-r_i|} \quad [16]$$

donde hemos usado la expresión para la presión emitida por una burbuja aislada. En la Ecuación 16 observamos el término correspondiente a la dispersión acústica generada por el resto del campo de burbujas:

$$\xi_i = \sum_{j \neq i}^N f_{sj} (p_a e^{ikz_j} + \xi_j) \frac{e^{ikr_{ij}}}{r_{ij}} \quad [17]$$

A su vez, esta ecuación constituye un sistema lineal de  $N$  ecuaciones para el conjunto de presiones  $\xi_i$ , el cual queda escrito en forma matricial en la siguiente expresión:

$$\xi = \Lambda(\Pi + \xi) \quad [18]$$

donde  $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_N]$  y  $\Pi = [e^{ikz_1}, \dots, e^{ikz_N}]$  representan los vectores de presión dispersada e incidente, respectivamente. Por otro lado,  $\Lambda$  es una matriz de acoplamiento acústico, que se define por:

$$\Lambda_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i = j \\ f_{sj} \frac{e^{ikr_{ij}}}{r_{ij}} & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad [19]$$

Reescribiendo la expresión y aplicando ciertos algoritmos de inversión podríamos obtener, de manera numérica, el valor de la presión dispersada en los alrededores de cada burbuja del campo fluido.

Así, se define la onda total que se propaga a través de la nube gaseosa superponiendo las ondas total e incidente:

$$\hat{p}(r) = p_a e^{ikz} + \sum_{j \neq i}^N f_{sj} (p_a e^{ikz_i} + \xi_i) \frac{e^{ik|r-r_i|}}{|r-r_i|} \quad [20]$$

donde  $z$  será la coordenada longitudinal del medio poroso. Esto nos permitirá obtener la presión acústica en cada punto del espacio, y calcular el valor característico de la atenuación en función de la frecuencia de excitación y las propiedades del campo de burbujas.

Para realizar el análisis mencionado, haremos uso de la intensidad acústica, expresada como el cuadrado del módulo de la presión total. Simulaciones realizadas para un radio de burbuja de  $250\mu\text{m}$  y un haz de ondas de frecuencia central  $0.5\text{MHz}$  han resultado en la siguiente figura:

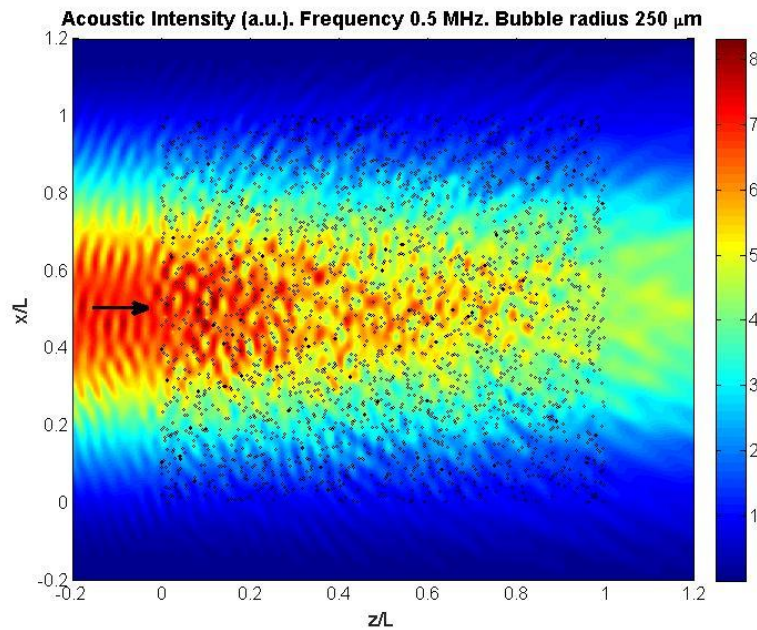


Figura 26 – Variación de la intensidad acústica en el medio

Como podemos ver, la intensidad acústica decae a medida que nos adentramos en la nube gaseosa, debido a las dispersiones y disipaciones ya mencionadas. En la Figura 27 podemos ver cómo evoluciona esta intensidad, para diferentes tamaños de burbuja media:

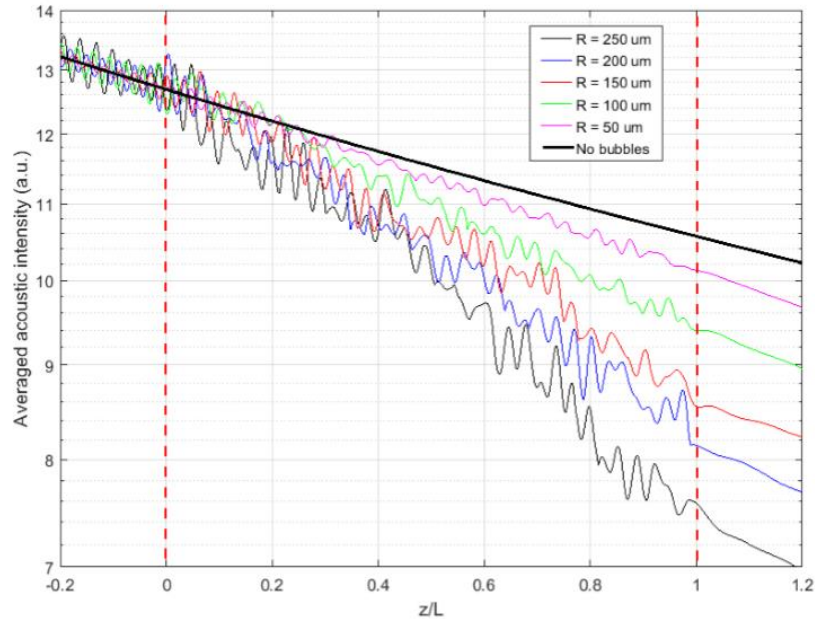


Figura 27 - Variación de la intensidad acústica, para diferentes tamaños de burbuja

Si tomamos como referencia la intensidad de la señal medida si no existieran burbujas (graficada como una línea negra), podremos definir el coeficiente de atenuación a través de la mencionada ley de Lambert-Beer:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad [21]$$

Así tendremos una atenuación:

$$\alpha = \frac{1}{L} \log \left( \frac{I_{ref}}{I_L} \right) = \frac{1}{L} \log \left( \frac{|p_{ref}|^2}{|p_L|^2} \right) \quad [22]$$

Donde hemos utilizado la expresión Ecuación 23, que describe la intensidad sonora a través de la presión de dicha onda, la velocidad del sonido en el medio y su densidad:

$$I = p^2 \cdot \frac{\cos(\phi)}{\rho_m c_m} \quad [23]$$

La Ecuación 22 dependerá, por tanto, de la frecuencia de la onda, del tamaño de burbujas y de la fracción de vacío presente en el sistema, como se muestra en las figuras Figura 27 y Figura 28.

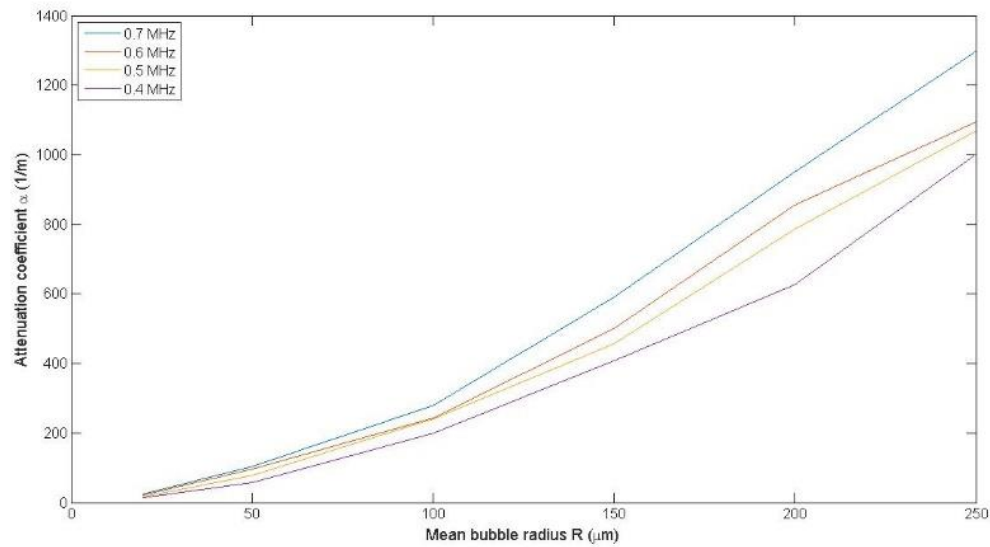


Figura 28 - Parámetro de atenuación frente al tamaño de burbuja (Teórico)

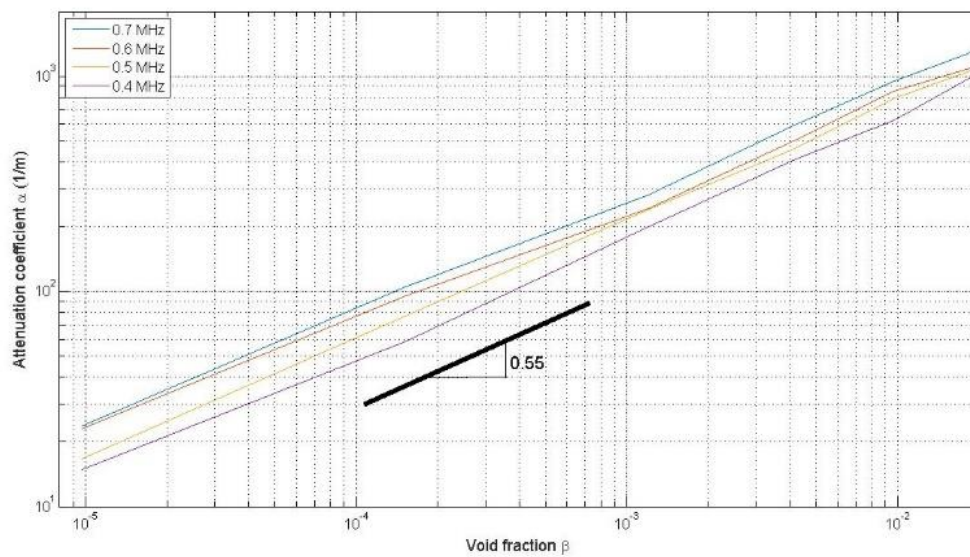


Figura 29 - Parámetro de atenuación frente a la Fracción de vacío (Teórico)

Estas figuras muestran claramente la dependencia que veníamos mencionando de la atenuación acústica con las características de tamaño y fracción de vacío, pudiendo escalar, de forma aproximada, una ley que relaciona ambos parámetros:

$$\alpha \propto \beta^{0.55}$$

[ 24 ]

## 8. Conclusiones.

De forma teórica, y apoyándonos en simulaciones por ordenador con condiciones controladas, obteníamos la correlación 24, que nos relaciona el parámetro de atenuación y la cantidad de burbujas presentes en el medio polimérico:

$$\alpha \propto \beta^{0.55}$$

Se presenta dicha relación con un factor potencial de 0.55, el cual se quiere comparar con los resultados experimentales.

Midiendo las pendientes de las curvas de  $\alpha = f(\beta)$  en la Figura 23 obtenemos un resultado altamente similar:

$$\alpha \propto \beta^{0.78}$$

Vemos que, para este caso, dicho factor potencial tiene un valor de 0.78.

A lo largo del proceso experimental, y su posterior análisis, y en vista de los resultados obtenidos, podemos confirmar que existe una alta correlación entre la población de gas atrapado, que existe en un medio poroso determinado, y la atenuación que sufre una onda acústica de carácter conocido a su paso por el mismo.

Por otro lado, es interesante destacar el papel del tamaño del poro en la componente atenuante del sistema. Como pudimos ver en la Figura 21 y la Figura 22, un mayor tamaño de poro provoca que la transmisión sea mayor, a la vez que reduce el efecto de la población de burbujas sobre la onda acústica.

Queda entonces confirmado, tras el análisis completo realizado, que el método empleado es fiable y eficaz y resulta viable caracterizar la población de gas atrapado en un determinado entorno haciendo uso de ondas de ultrasonido.

Un posible siguiente paso, como avance a la metodología expuesta en esta memoria, sería estudiar qué ocurre al cambiar el gas que está en disolución. En ningún momento se ha especificado el gas que forma las burbujas, en el sentido de que no ha sido necesario hacer uso de las propiedades del aire tales como densidad, calor específico o difusividad. Por esto, podemos intuir que los resultados serán igualmente válidos para cualquier tipo de gas, salvo variaciones en la rapidez de disolución de las burbujas.

Un caso concreto que se estudió parcialmente en el laboratorio fue el agua carbonatada. Haciendo uso de agua sobresaturada de  $CO_2$  podríamos estudiar el comportamiento del sistema al igual que hemos realizado con el aire. Los resultados obtenidos demostraron que el  $CO_2$  sufre más los efectos de las sobrepresiones generadas en la cámara y, por tanto, los tiempos de disolución eran mucho menores.



## 9. Bibliografía.

*"Rayleigh-Plesset equation."* - Wikipedia.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh%E2%80%93Plesset\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh%E2%80%93Plesset_equation)

La comunidad petrolera – *"Métodos para determinar las reservas de hidrocarburos en función del tiempo o grado de agotamiento."*

<http://ingenieria-de-petroleo.lacomunidadpetrolera.com/2008/11/metodos-para-estimar-las-reservas-de.html>

*"Parámetros que definen el ruido."*

[http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(1\)%20prop%20fis%20del%20ruido/param%20que%20definen%20el%20ruido.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(1)%20prop%20fis%20del%20ruido/param%20que%20definen%20el%20ruido.htm)

Slideshare – *"Mecánica de yacimientos"* (Fuente original desconocida).

<http://es.slideshare.net/mardo87/mecanica-de-yacimientos>

*"Cálculo de reservas en yacimientos de gas."* – Martínez Fuentes, Ricardo y Valdez Cuevas, Jorge Enrique [México D.F., 2011, Tesis profesional Ingeniero Petrolero, Universidad Nacional Autónoma de México]

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2263/Tesis.pdf?sequence=1>

*"Non-invasive assesment of CO<sub>2</sub> bubble dissolution in 3D-printed porous media."* – Parrales, Miguel A., Peñas López, Pablo y Rodríguez Rodríguez, Javier [Fluid Mechanics Research Group, Universidad Carlos III de Madrid]

*"Kinetic Model of Gas Bubble Dissolution in Groundwater and Its Implications for the Dissolved Gas Composition."* – Holocher, J., Peeters, F., Aeschbach-Hertig, W., Kinzelbach, W. y Kipfer, R.

*"On the Stability of Gas Bubbles in Liquid-Gas Solutions"* – Epstein, P.S. y Plesset, M.S. [California, 1950, Instituto Tecnológico de California, Pasadena, California]